



Поиск универсальных дополнительных измерений в эксперименте D0

Щукин А.А.

Введение

Многочисленные экспериментальные проверки СМ пока не выявили серьезных разногласий с теорией

Недостатки СМ

- не описывает явления, связанные с гравитацией
- не объясняет число поколений кварков и лептонов
- не предсказывает массы фундаментальных частиц
- не решает проблемы иерархии
- не объясняет асимметрию относительно материи и антиматерии
- и т.д.

Расширения СМ

- суперсимметрия
- дополнительные пространственные измерения
- техникolor
- и другие

DO: 118 публикаций по поиску явлений за пределами СМ

Теории дополнительных измерений

Попытка объединить гравитацию и электромагнетизм

- Т.Калуца расширил пространство Минковского до 5-мерного (1921)
- Применил уравнения общей теории относительности к 5-мерному пространству и получил классические уравнения Максвелла

Ненаблюдаемость пятого измерения

- Обоснована О.Клейном в 1926
- Пятая координата длиноподобна и имеет два свойства: круговую топологию и масштаб компактификации
- Каждая точка в 4-мерном пространстве – мельчайшая окружность в 5-мерном
- Размер дополнительного измерения близок к планковской длине

Универсальные дополнительные измерения

Универсальные дополнительные измерения

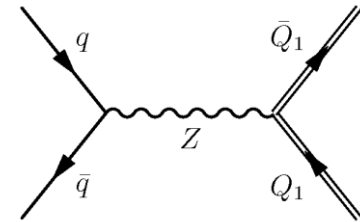
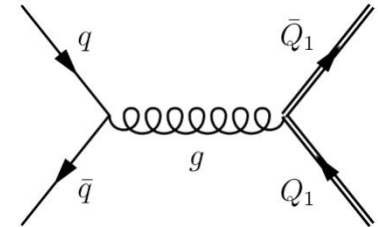
- Аппельквист, Ченг, Добреску (ACD или UED модель)
- Все взаимодействия распространяются в дополнительные измерения
- Каждой частице SM соответствует КК-партнер

- Дополнительные измерения компактифицированы в размеры порядка $R^{-1} \sim \text{ТэВ}$
- Модель mUED становится достаточно предсказуемой если все граничные условия исчезают при некоторой пороговой энергии $\Lambda > R^{-1}$
- Легчайшая КК-частица стабильна – *кандидат на роль темной материи?*

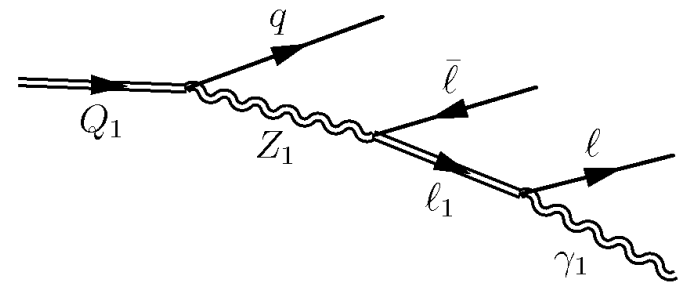
Массовый спектр n-й КК-моды:
$$m_n^2 = m_0^2 + \frac{n^2}{R^2}$$

Универсальные дополнительные измерения

Парное рождение КК-кварков
на протон-антипротонном коллайдере



Каскадный распад КК-кварка



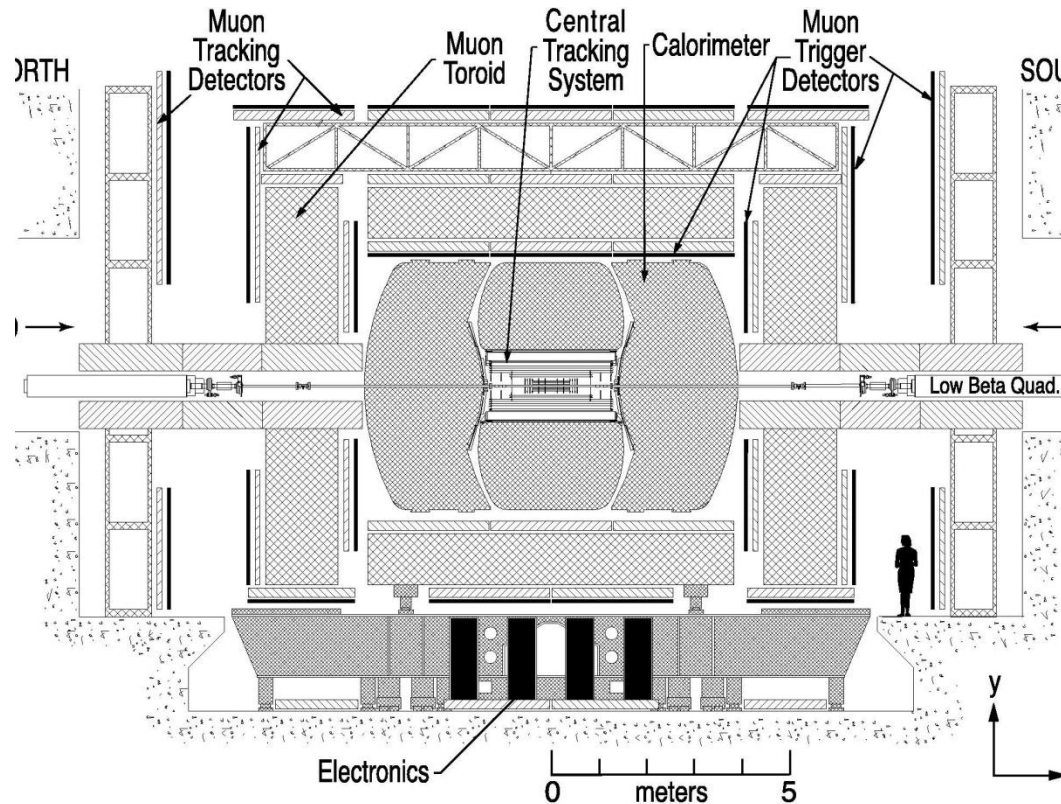
Эксперимент D0

Протон-антипротонный коллайдер Tevatron (1.96 ТэВ в с.ц.м.)

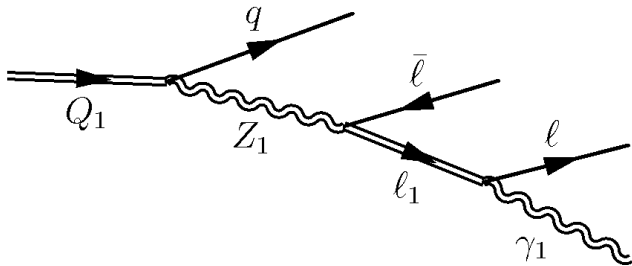
Закончил работу в 2011 г.

Доставил около 11 фб^{-1}

Два многоцелевых детектора: CDF и D0



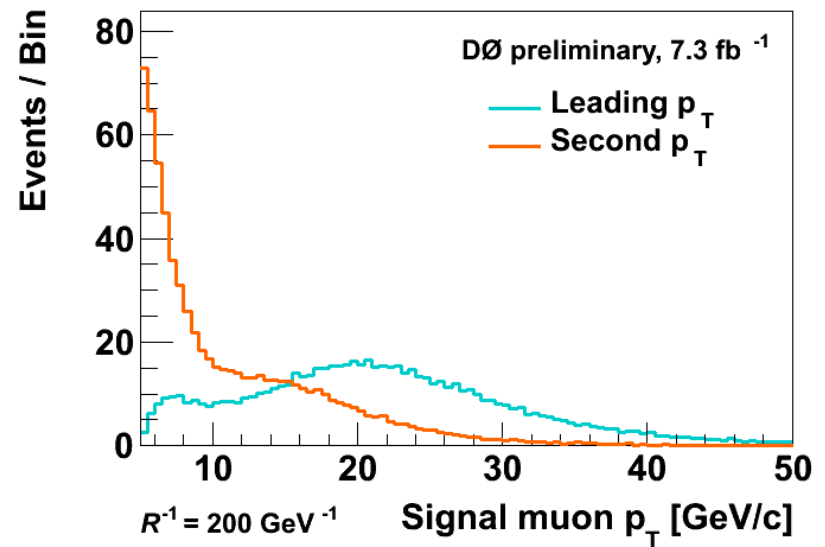
Поиск универсальных дополнительных измерений



При парном рождении КК-частиц в конечном состоянии образуется:

- 4 лептона
- 2 струи
- недостающая поперечная энергия (MET)

- Лептоны могут быть очень «мягкими»
- Мюоны проще идентифицировать
- У мюонных триггеров порог по p_T значительно ниже, чем у электронных
- Исследуемая сигнатура - два мюона одного знака + MET



Данные и МС

- Исследовалась выборка, соответствующая интегральной светимости 7.3 фб^{-1}
- Фоновые процессы смоделированы:
Z+jets, W+jets, ttbar – ALPGEN+PYTHIA
WW, WZ, ZZ – PYTHIA
КХД – из данных (см. ниже)
- Сигнал смоделирован PYTHIA в диапазоне $R^{-1}=200\text{-}320 \text{ ГэВ}$, $\Lambda=10 \text{ ТэВ}$

R^{-1}	$m(\gamma_1)$	$m(Z_1)$	$m(g_1)$	$m(l_1)$	$m(Q_1)$	$\sigma, \text{ пб}$
200	201	230	269	207	249	34.93
215	216	245	287	222	266	20.36
230	231	260	305	238	283	12.06
245	246	274	323	253	300	7.24
260	261	289	341	268	317	4.39
275	276	304	359	284	334	2.68
290	291	319	377	299	351	1.65
305	306	335	395	314	368	1.02
320	321	350	413	330	385	0.63

Отбор событий

- Срабатывание любого **одномюонного триггера**
- **2 мюона одного знака**
- $p_{T1} > 15$ ГэВ
- $p_{T2} > 10$ ГэВ
- $M_{\mu\mu} > 20$ ГэВ
- Каждому мюону должен соответствовать трек с критерием χ^2 «сшивки» < 9.5
- $p_{T1} < 200$ ГэВ, $M_{\mu\mu} < 200$ ГэВ – для уменьшения вероятности неверного определения заряда
- $MET > 25$ ГэВ – для уменьшения фона от КХД процессов
- **Число точек на треке** центрального волоконного треккера > 1
- Разница во времени срабатывания слоев мюонной системы < 10 нс – для подавления космических частиц
- **Азимутальный угол** между мюонами $0.25 < \Delta\phi < 2.9$ – при малых углах затруднена идентификация мюонов, а при больших – доминирует КХД фон

Изолированность мюона

I_{cal} – суммарное энергосодержание в ячейках калориметра между конусами $\Delta R=0.1$ и $\Delta R=0.4$

I_{trk} – сумма поперечных импульсов всех треков в конусе, ограниченном $\Delta R=0.5$

- Один мюон должен быть «жестко» изолированным ($I_{cal} < 0.4$, $I_{trk} < 0.12$)
- Второй мюон может быть «мягко» изолированным ($I_{cal} < 0.4$, $I_{trk} < 0.25$)

Моделирование КХД фона

Моделирование методами МС затруднено – большие сечения, неудовлетворительное согласие с экспериментом

Оценка КХД фона из данных

Формируются две выборки S и Q :

Выборка S (сигнал) – один из мюонов «жестко» изолирован, второй – «мягко»

Выборка Q (фон) – один из мюонов «жестко» изолирован, второй – не является даже «мягко» изолированным

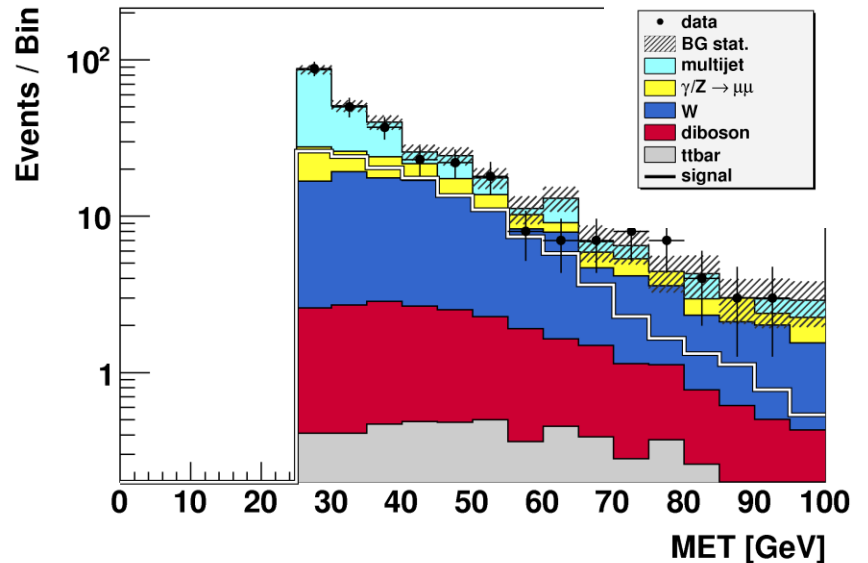
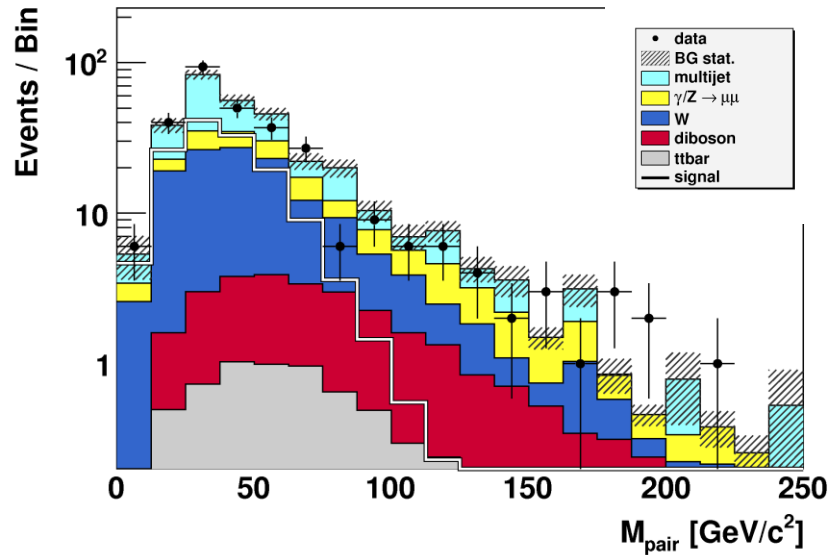
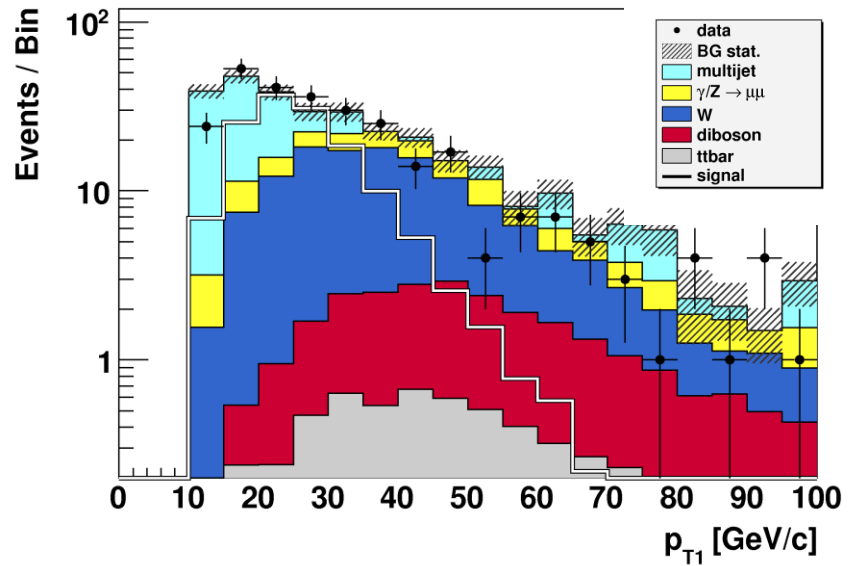
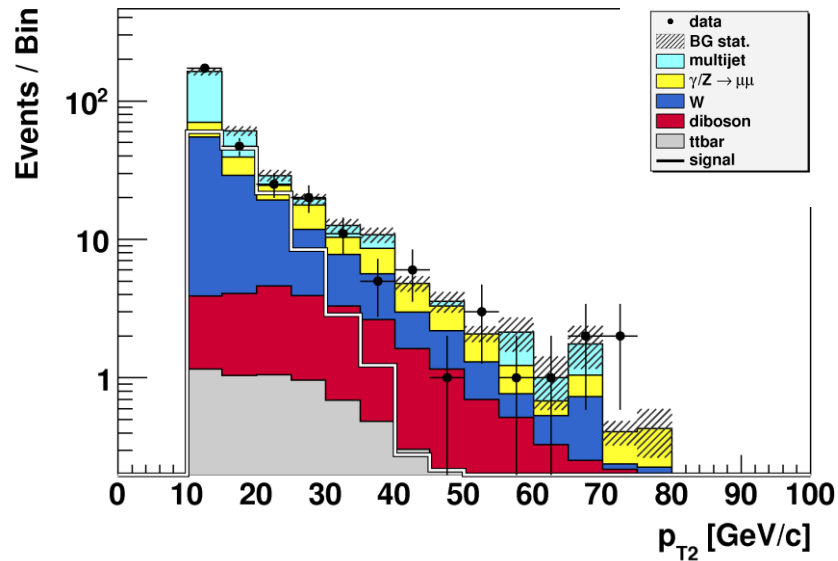
События в S и Q похожи, но в Q подавляющее число событий порождены КХД фоном

Можно выбрать кинематическую область, где КХД процессы доминируют, параметризовать его и применить параметризацию в области, ортогональной предыдущей.

Параметризация фона осуществлялась в области $p_T < 10$ ГэВ, где КХД процессы доминируют в обеих выборках

$$QCD = N_i \times Q \quad (p_T > 10 \text{ ГэВ})$$

Моделирование КХД фона

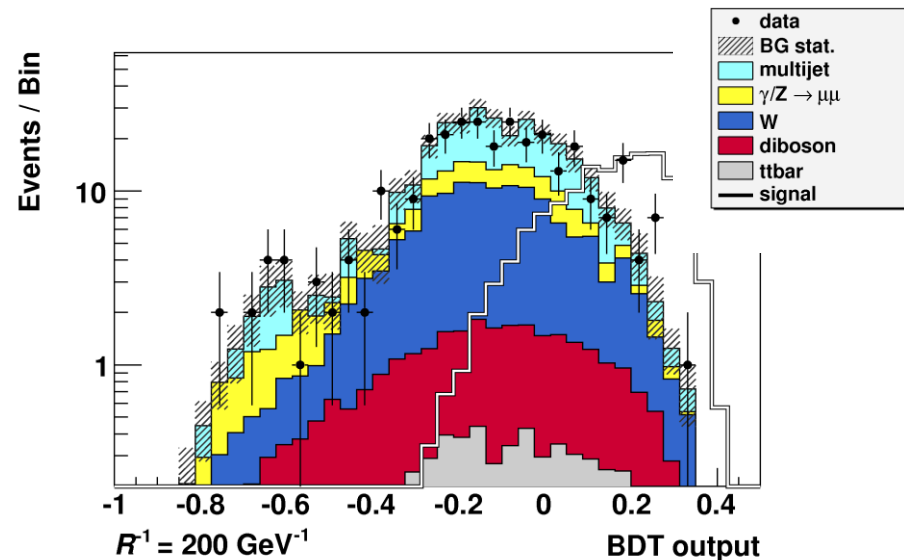


Отделение сигнала от фона

Для оптимизации отделения сигнала от фона было выбрано 12 переменных:

- Поперечный импульс лидирующего мюона pT_1
- Поперечный импульс второго мюона pT_2
- Азимутальный угол между мюонами $\Delta\phi$
- Недостающая поперечная энергия MET
- Скалярное произведение $MET \times pT_2$
- Величина χ_1^2, χ_2^2 фита «сшивки» мюонных треков в центральном треккере и мюонной системе
- Число струй в событии
- Инвариантная масса мюонной пары $M_{\mu\mu}$
- Поперечные массы вычисленные по (pT_1, MET) и $(pT_2, MET) - M_{T1}, M_{T2}$
- Значимость недостающей поперечной энергии $Sig(MET)$

BDT – Boosted Decision Trees



Систематические погрешности

Измерение светимости – 6.1%

Измерение энергии струй – 4.1%

Идентификация мюонов – 2%

Восстановление мюонного трека – 1%

Измерение изолированности мюона – 0.5%

Сечения в МС:

W+jets – 8.5%

Z/ γ - 3.5%

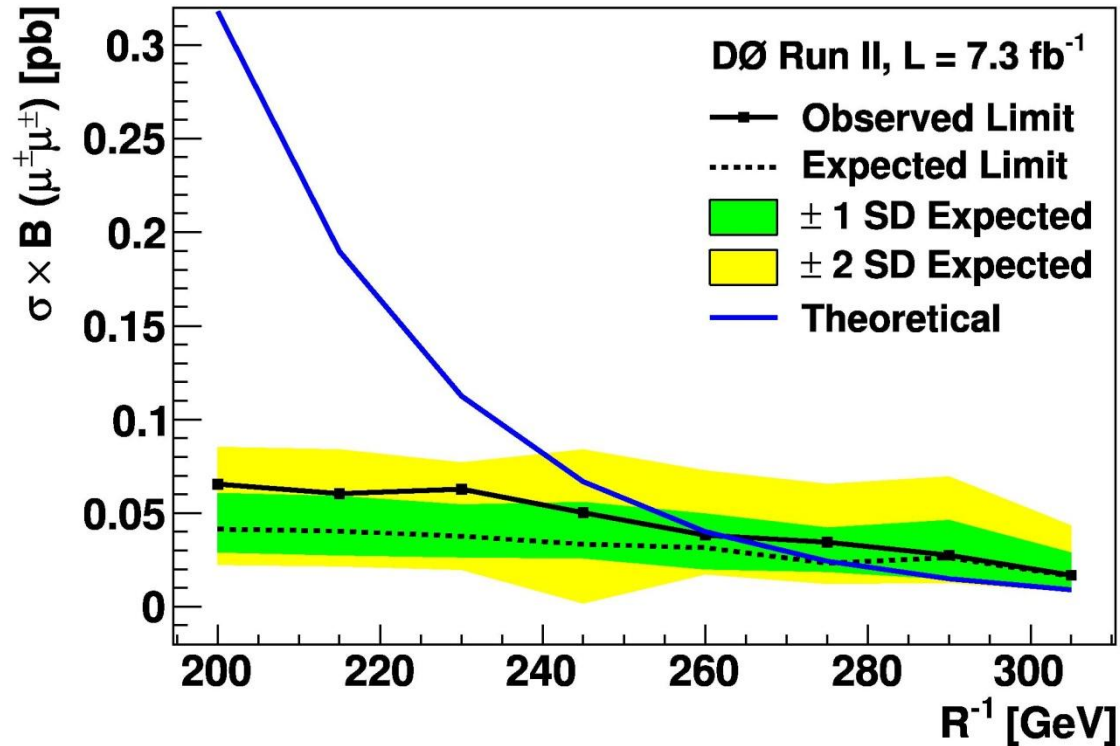
Dibosons – 7%

ttbar – 15%

Моделирование КХД-фона – 40%

Определение заряда мюона – 21%

Результаты



С уровнем достоверности 95% исключается область $R^{-1} < 260 \text{ ГэВ}$, что соответствует области масс легчайшего КК-кварка $m(Q_1) < 317 \text{ ГэВ}$

Заключение

- Проанализированы данные, соответствующие накопленной светимости 7.3 fb^{-1}
- Полученные результаты позволили с $CL=95\%$ исключить область $R^{-1} < 260 \text{ ГэВ}$, что соответствует области масс легчайшего КК-кварка $m(Q_1) < 317 \text{ ГэВ}$
- Выполненная работа является первым прямым поиском универсальных дополнительных измерений в рамках модели mUED

Результаты опубликованы в **Phys. Rev. Lett. 108, 131802 (2012)**

Спасибо за внимание!